

MODELOS PREDICTIVOS DE DISTRIBUCIÓN DE ESPECIES COMUNES EN MATORRALES BASÓFILOS DE NAVARRA: APLICACIÓN EN DISTINTOS ESCENARIOS CLIMÁTICOS

J. M. Olano Mendoza¹ & J. Peralta Andrés²

¹Dpto. de Ciencias Agroforestales, Escuela de Ingenierías Agrarias, E-42004 SORIA

²Dpto. de Ciencias del Medio Natural, Universidad Pública de Navarra, E-31006 PAMPLONA

Resumen

Mediante el uso de modelos lineales generalizados (MLG) se establecen funciones de respuesta que explican la distribución de siete especies comunes en matorrales basófilos de Navarra. La precipitación es el principal factor que condiciona la distribución de las especies, seguido de la orientación y la insolación. Las funciones obtenidas se aplican para predecir la distribución espacial actual y la probabilidad de aparición bajo tres escenarios de reducción de la precipitación media anual. Se constata el retroceso de las especies eurosiberianas y el avance de los táxones mediterráneos hacia el norte, especialmente de los más xerófilos. Los cambios de área están influidos por el patrón de distribución de la precipitación y el relieve en Navarra. Las montañas representan refugios para algunas especies eurosiberianas y barreras para las mediterráneas; los valles constituyen corredores que facilitan el avance de la flora mediterránea.

INTRODUCCIÓN

El clima es uno de los factores más decisivos en la distribución de las plantas. Por ello, los indicios de la existencia de un cambio climático global, llevan a pensar que las espe-

cies vegetales puedan comenzar a mostrar cambios en sus áreas de distribución en un futuro no muy lejano. La predicción del sentido y magnitud de dichos cambios requiere la modelización de la distribución de la vegetación; con este fin se han desarrollado diferentes enfoques: unos trabajan con comunidades vegetales (RETUERTO & CARBALLEIRA 1992, GAVILÁN & FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ 1997, OLANO *et al.* 2000) mientras que otros abordan el estudio de especies concretas. Este último es el enfoque individualista, que es el que mayor desarrollo ha alcanzado y que está relacionado con el concepto de nicho, su objetivo es definir aquellos parámetros que determinan la aparición de una especie.

Se impone por tanto tratar de relacionar datos referidos a las localidades en donde aparece y no aparece una especie, para conocer los factores que determinan su presencia. Para el manejo de datos de presencia y ausencia diferentes autores (AUSTIN *et al.* 1990, YEE & MITCHELL, 1991) han empleado modelos lineales generalizados (en adelante MLG) para modelizar la distribución de las especies en función de parámetros ambientales. Estos modelos tienen un enfoque probabilístico, asumen la existencia de una relación unimodal entre la probabilidad de presencia de una especie y las variables ambientales de interés. Aunque existen excepciones a esta norma, ya

que existen distribuciones bimodales, esta asunción se cumple en la mayor parte de los casos (véase AUSTIN & SMITH, 1989 para una discusión).

La aplicación de estas técnicas en el estudio de distribución de la vegetación ha sido muy amplia, utilizándose a escalas muy diversas y con distintos objetivos, desde conocer la respuesta de las especies forestales a las características edáficas (PAUSAS 1993) al estudio de distribución de diferentes especies en climas locales (GUISAN *et al.* 1999) o incluso a escala de países enteros (LENIHAN, 1993). Una vez obtenidos los modelos de respuesta es posible predecir la aparición de una especie en lugares diferentes de los muestreados y en condiciones distintas de las actuales.

La importancia del gradiente norte-sur de precipitación en la distribución de las formaciones vegetales del Valle del Ebro es un fenómeno bien conocido que determina la existencia de un fuerte recambio florístico en el que la flora eurosiberiana (medioeuropea y cántabro-atlántica) da paso a la mediterránea (BRAUN-BLANQUET & BOLÒS, 1957, LOIDI & BÁSCONES, 1995). Este cambio está relacionado con la limitación que supone el estrés hídrico estival característico del clima mediterráneo, y su atenuación desde el centro del Valle del Ebro hacia el norte-noroeste por la mayor influencia de las borrascas atlánticas. Los pronósticos de una disminución de las precipitaciones, especialmente las estivales (HULME & SHEARD, 1999), hacen previsibles variaciones en la distribución de especies.

El objetivo de este trabajo es aplicar la metodología de los MLG para establecer modelos de respuesta para especies de distintos tipos de matorral basófilo en el Valle del Ebro y utilizarlos para crear mapas de distribución potencial de dichas especies en las condiciones actuales y bajo tres escenarios futuros con una disminución de la precipitación media anual.

MATERIAL Y MÉTODOS

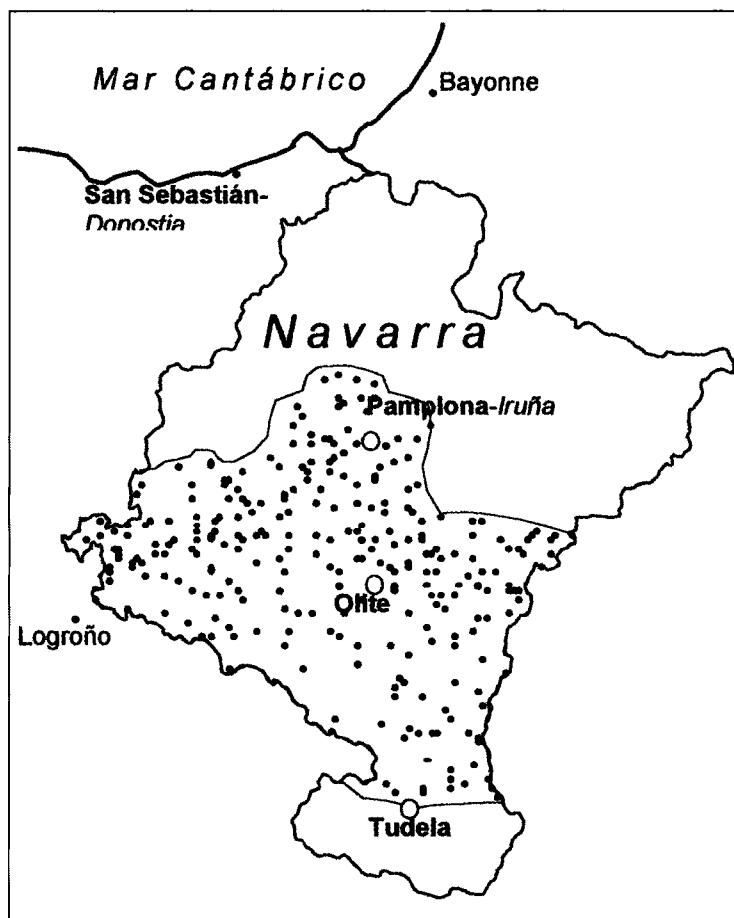
El área de estudio comprende 5.400 Km²

situados en los dos tercios meridionales de Navarra, y se corresponde con un transecto N-S de 90 km y de 100 Km E-W, del Valle del Ebro (mapa 1) en el que se pasa del macrobioclima mediterráneo de la zona sur al macrobioclima templado del norte (RIVAS-MARTÍNEZ, 1996). El territorio incluye las zonas mediterráneas semiáridas de Bardenas y Ribera Estellesa, la Navarra Media de ombroclima de seco a subhúmedo, y las áreas submediterráneas y eurosiberianas de la Cuenca de Pamplona y Sierras de Lokiz, Urbasa, Andía, Perdón y Alaitz-Izco, con ombrotipo de subhúmedo a húmedo (LOIDI & BÁSCONES 1995). El rango de altitud está comprendido entre 300 y 1200 m y la precipitación media anual entre 425 y 1600 mm. Los sustratos calcáreos predominan y los suelos de las localidades estudiadas suelen ser someros y ricos en bases.

Para el trabajo se seleccionaron siete especies comunes en matorrales basófilos (matorrales pulviniformes de otavera, tomillares, aliagares y romerales) por la abundancia y diversidad de estas comunidades en el área de estudio, y por la mayor sensibilidad de las comunidades seriales a cambios ligeros en las condiciones del entorno. Estos matorrales se incluyen en las alianzas *Genistion occidentalis* (*Festuco-Ononidetea striatae*), *Sideritido-Salvion* y *Aphyllanthion* (*Rosmarinetea officinalis*) y normalmente constituyen etapas de sustitución de robledales pubescentes, quejigales, hayedos, carrascales o coscojares.

Las especies seleccionadas muestran una adaptación creciente a las condiciones mediterráneas y son: *Brachypodium pinnatum*, *Genista occidentalis* (= *Genista hispanica* subsp. *occidentalis*), *Dorycnium pentaphyllum*, *Brachypodium retusum*, *Thymus vulgaris*, *Rosmarinus officinalis* y *Echinops ritro*.

Los datos de distribución de las especies proceden de 279 inventarios (PERALTA, 1995-96; PERALTA & OLANO, 1997-98) de los que se conoce su pendiente, altitud, orientación y litología. La precipitación media anual de cada localidad se obtuvo a partir de un mapa pluviométrico de la zona (CREUS, 1986). Para su utilización en los modelos como una de las variables, las litologías fueron agrupadas en



Mapa 1. Área de estudio y localización de los inventarios realizados

distintas clases de acuerdo con su consistencia.

Se utilizaron MLG para calcular la superficie de respuesta de las diferentes especies. Estos modelos son una ampliación de los modelos de regresiones lineales, que tienen sobre estos la ventaja de que no requieren una distribución normal de los errores y permiten un rango más amplio de relaciones entre el modelo de respuesta y las variables explicativas (AUSTIN *et al.* 1990). Se escogió como modelo de respuesta un sistema logístico, donde la respuesta de la especie a las variables explicativas asume la forma de una curva Gaussiana. El modelo relaciona mediante una respuesta unimodal la presencia de la especie con la variación de las condiciones ambientales. Para modelar la respuesta de la especie a las condiciones ambientales se empleó una regresión múltiple que responde

a la función:

$$\log [p/(1-p)] = b_0 + b_1x_1 + b_2x_1^2 + b_2x_1^2 + b_3x_2 + b_4x_2^2 + \dots + b_{z-1}x_n + b_zx_n^2 \quad (1)$$

Donde p es la probabilidad de ocurrencia del suceso, $x_1 \dots x_n$ son las variables explicativas y $b_0 \dots b_z$ son los coeficientes de regresión.

Las variables se iban incluyendo en el modelo una a una, comenzando por aquella que expresaba un mayor porcentaje de la varianza. El requisito para la entrada era que la variable mejorase de un modo significativo el modelo (0,05). Una vez añadida una variable se prosigue de modo iterativo con la segunda que cumpliera dicho requisito. Al añadir nuevas variables se calculaba de nuevo la mejora del modelo de cada una de las variables anteriores; si al introducir una nueva variable la significación en la mejora del modelo de una variable ya introducida descendía hasta el 0,10, dicha variable era eliminada y el modelo recalculado. Dicho proceso continuaba iterativamente hasta alcanzar una solución estable. Los análisis se realizaron utilizando SPSS 8.0. Los

modelos fueron testados mediante la $-2LL$ (NORUSIS 1994).

Para el análisis se seleccionarán trece variables (tabla 1), cuatro simples (altitud, pendiente, orientación y consistencia) y el resto funciones de las variables iniciales. La variable circular orientación se transformó mediante el coseno, siendo máximo para la orientación norte y mínimo para la sur. La insolación se obtuvo como producto del seno de la pendiente en grados por el coseno de la orientación. La termicidad se obtuvo con la misma fórmula pero restando 45° a la orientación para que los mínimos se dieran en el sudeste.

Los modelos obtenidos se aplicaron a las localidades muestreadas, bajo las condiciones climáticas actuales y en tres escenarios de menor precipitación (90%, 80%, 70% de la

Tabla 1. Variables de los modelos de simulación. El número indica el orden de entrada en el modelo y el signo indica el sentido de la interacción

	<i>Thymus vulgaris</i>	<i>Brachypodium retusum</i>	<i>Dorycnium pentaphyllum</i>	<i>Rosmarinus officinalis</i>	<i>Echinops ritro</i>	<i>Genista occidentalis</i>	<i>Brachypodium pinnatum</i>
Precipitación				2 (+)	1 (-)	1 (-)	1 (+)
Altitud						2 (+)	
Pendiente		2 (+)					
Orientación				2 (-)		3 (+)	2 (+)
Insolación							
Termicidad			3 (-)				
Consistencia	1 (+)			3 (+)			
Precipitación ²		1 (-)	1 (-)				1 (+)
Altitud ²							
Insolación* Precipitación	2 (+)				2 (+)		
Insolación* Precipitación ²		3 (+)	4 (+)				
Consistencia* Precipitación	3 (+)						
Consistencia* Precipitación ²	4 (-)						

precipitación actual). Con estos modelos se elaboraron mapas de probabilidad de aparición de cada especie en los diferentes escenarios y su abundancia total se calculó mediante el sumatorio de la probabilidad de cada una en todos los puntos.

RESULTADOS

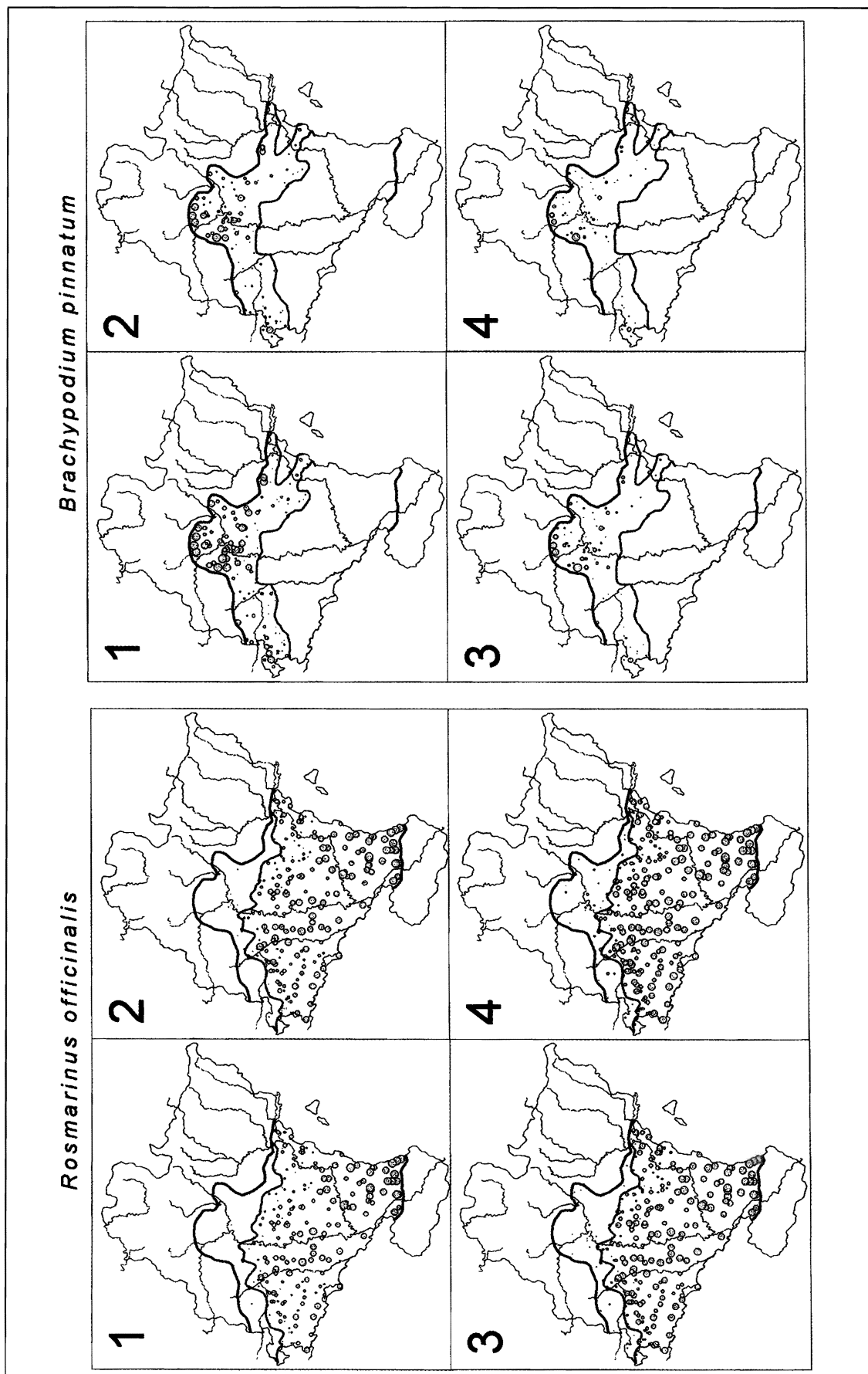
Todas las especies muestran modelos significativos con los parámetros utilizados. Los modelos logísticos obtenidos incluyen de dos a cuatro variables para cada especie (tabla 1). El orden de introducción de cada variable en el modelo es un reflejo de su importancia; ésta es mayor en las que intervienen en primer lugar. El signo indica el sentido de la influencia de la variable en el modelo: en los positivos el incremento del valor de la variable implica una mayor probabilidad de presencia de la especie y viceversa.

La precipitación y su cuadrado son los parámetros que intervienen en más modelos, seguidos de la orientación. La consistencia participa en dos ocasiones individualmente y en otras dos combinada con la precipitación.

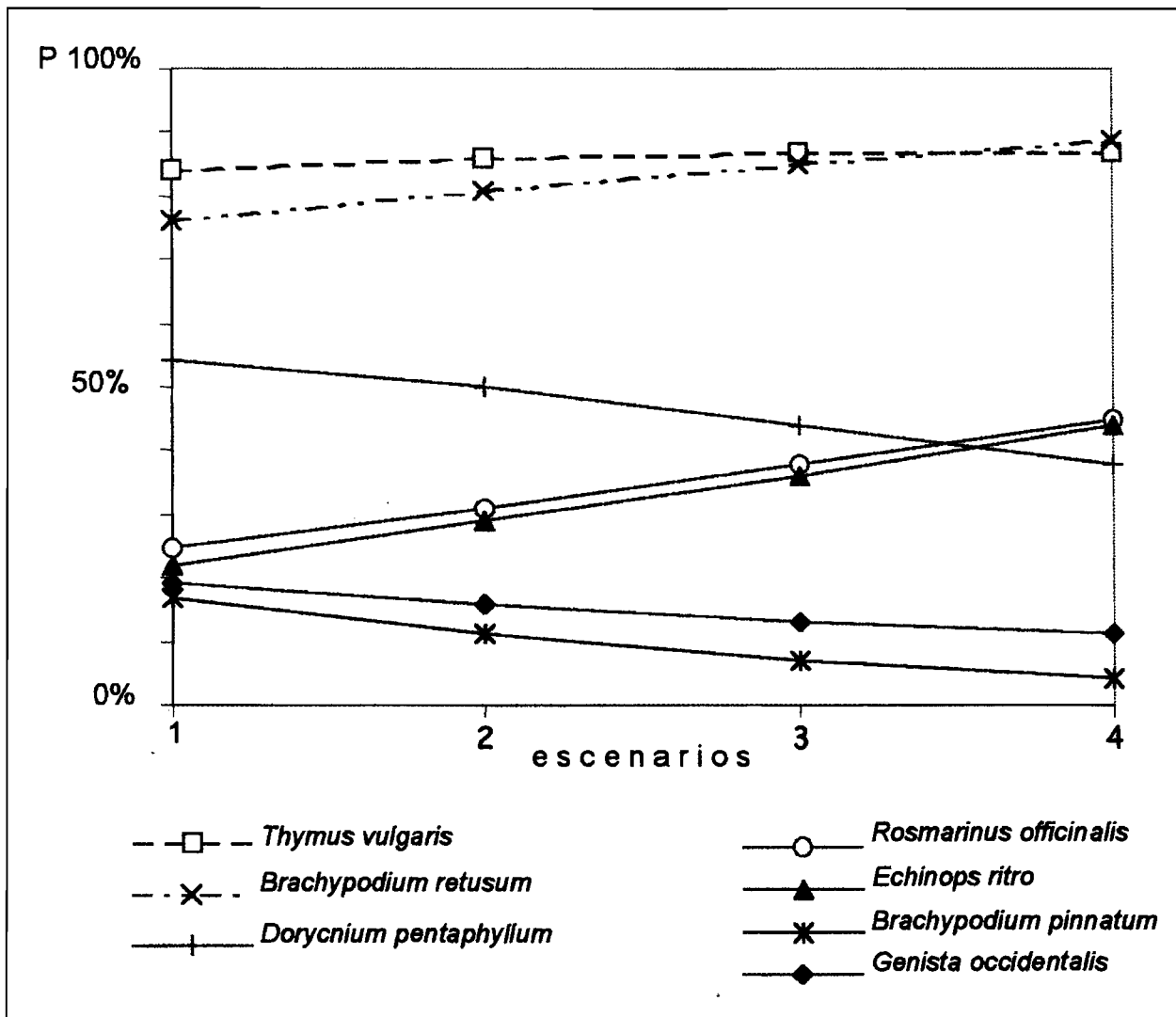
La altitud, pendiente y termicidad sólo participan en un modelo cada una. La insolación y el cuadrado de la altitud no participan individualmente en ninguno de los modelos, aunque la insolación combinada con la precipitación o su cuadrado interviene en cuatro modelos. Los mapas obtenidos a partir de los modelos para el escenario actual son muy semejantes a la distribución encontrada en el muestreo, si bien permiten apreciar la probabilidad de ocurrencia de la especie en todos los puntos aunque en los datos de campo no apareciera.

En los diferentes escenarios de descenso pluviométrico las especies medioeuropeas, cantábrego-atlánticas y submediterráneas (*Brachypodium pinnatum* (mapa 2), *Genista occidentalis* y *Dorycnium pentaphyllum*) experimentan un retroceso en su área de distribución, mientras las mediterráneas (*Thymus vulgaris*, *Brachypodium retusum*, *Rosmarinus officinalis* (mapa 3) y *Echinops ritro*) se extienden hacia el norte.

La intensidad de este cambio varía en función de las especies (gráfica 1). *Brachypodium pinnatum* y *Genista occidentalis* parten de abundancias iniciales seme-



Mapas 2 y 3. Distribución de *Rosmarinus officinalis* y *Brachypodium pinnatum* en diferentes escenarios. 1: situación actual, 2: 90% de la precipitación media anual actual (P), 3: 80% P, 4: 70% P.



Gráfica 1. Probabilidad acumulada en todas las parcelas para las especies de matorral en diferentes escenarios. 1: situación actual, 2: 90% de la precipitación actual, 3: 80% de la precipitación actual y 4: 70% de la precipitación actual

jantes (17% y 19%); en un escenario con disminución del 30% de la precipitación, *Brachypodium* disminuye su abundancia hasta el 4% (24% de la inicial), mientras que en dichas condiciones *Genista* tan sólo retrocede hasta un 11% (56%). *Dorycnium pentaphyllum* muestra un patrón similar a las especies anteriores con un descenso pronunciado, si bien al partir de valores más elevados de presencia, la importancia relativa de su disminución es menor.

Las especies mediterráneas más xerófilas son las que registran un mayor aumento de abundancia, con un incremento relativo del

77% y 97% para *Echinops ritro* y *Rosmarinus officinalis* respectivamente; estos porcentajes son mucho menores en taxones mediterráneos de distribución más amplia: 18% para *Brachypodium retusum* y 4% para *Thymus vulgaris*. En el caso de *Thymus vulgaris*, incluso hay un ligero descenso al pasar del 80% al 70% de precipitación actual.

DISCUSIÓN

De acuerdo con los modelos obtenidos la precipitación es el principal factor determi-

nante de la distribución de las especies presentes en los matorrales basófilos en este sector del Valle del Ebro. Esta variable interviene, de modo independiente o combinada, en 13 de los 21 parámetros que forman los modelos (tabla 1), y sólo en el caso de *Thymus vulgaris* no es el primer factor en importancia.

La orientación y la insolación modulan el efecto de la precipitación, de modo directo en el primer caso o combinado en el segundo, e intervienen en todos los modelos, ya que al alejarse las especies de su óptimo de precipitación buscan ubicaciones que compensen el aumento o disminución de ésta. La inclusión de estas variables en el modelo, permite obtener un valor más cercano a la disponibilidad hídrica real de las plantas (OLANO et al. 2000).

La consistencia del sustrato participa en los modelos de *Rosmarinus officinalis* y *Thymus vulgaris*. Ambas especies son más frecuentes sobre materiales coherentes. La consistencia del sustrato está relacionada en la zona con la profundidad del suelo; sobre los sustratos con mayor consistencia (areniscas, calizas) los suelos son más someros, tienen menor capacidad de retención hídrica y, por lo tanto, constituyen ambientes más xéricos que permiten la incursión de especies xerófilas en áreas de mayor precipitación. El efecto de la consistencia es semejante al de la orientación, pero sólo participa en los modelos de las dos especies citadas. Esto puede deberse a que la colonización de suelos someros quizá implique adaptaciones especiales, lo que impediría que otras especies de las consideradas se instalen en estos medios. La importancia de la consistencia por encima de la precipitación, en el modelo de *Thymus vulgaris*, es probablemente un efecto de su distribución generalizada en el área de estudio, lo que indica que las condiciones de precipitación tienen un menor peso que otros factores relacionados con el relieve y el sustrato.

A pesar de que la altitud es un factor de enorme importancia en la distribución de las especies, su peso en los modelos estudiados es muy reducido: sólo interviene en el mode-

lo de *Genista occidentalis*. La altitud es un factor complejo normalmente correlacionado con temperatura y precipitación; en este caso el modelo introduce la variable precipitación en lugar de la altitud, ya que ésta no deja de ser una estima de la primera, y además presenta anomalías en áreas septentrionales como las Cuencas de Pamplona y Sangüesa, de baja altitud pero más lluviosas que áreas de similar altitud más meridionales. El otro aspecto relacionado con la altitud, la temperatura, no parece tener excesiva importancia en el área debido a lo limitado del gradiente altitudinal, lo que parece corroborar la escasa participación de la termicidad en los modelos.

Los cambios en la distribución de las especies en los distintos escenarios constata el desplazamiento de la flora eurosiberiana por la mediterránea (mapa 2 y 3, gráfica 1); sin embargo, el grado de variación de las diferentes especies difiere notoriamente.

La distribución de la precipitación en Navarra está muy condicionada por la disposición del relieve: en las montañas del norte del área existe un fuerte gradiente pluviométrico, mientras que en los relieves más suaves del sur el gradiente es menor. Por esta configuración del relieve y la precipitación, las especies más xéricas (*Rosmarinus officinalis*, *Echinops ritro*), con un mismo cambio de precipitación disponen de áreas más extensas sobre las que avanza que *Thymus vulgaris* o *Brachypodium retusum*, para las cuales los cambios de precipitación en sus áreas septentrionales, no permiten un aumento notable en su extensión.

El comportamiento de *Rosmarinus officinalis* es un ejemplo de esta situación; se observa que la disminución inicial de precipitación supone un notable avance de su límite septentrional, mientras que en escenarios de menor precipitación el desplazamiento es menor y el incremento de su abundancia se manifiesta sobre todo en su consolidación (aumento de la probabilidad) en el territorio ocupado. De hecho, los progresos más notorios hacia el norte se producen por los valles de los ríos principales, donde el gradiente

altitudinal, y por tanto pluviométrico, es menor.

Por otra parte, las especies que son más abundantes disponen de un menor número de localidades que colonizar y por tanto siempre tenderán a mostrar un menor aumento en su abundancia, máxime si dicho cambio se considera de modo relativo.

Las especies eurosiberianas y submediterráneas se enrarecen de modo progresivo en los distintos escenarios. Es particularmente notoria la práctica desaparición de *Brachypodium pinnatum*, mientras *Genista occidentalis* queda acantonada en las montañas. *Dorycnium pentaphyllum* experimenta una retracción de su límite meridional de distribución y una expansión hacia el norte.

Este tipo de modelos permite conocer qué parámetros determinan la distribución de una especie en un área determinada y sirven para la elaboración de cartografía a partir de la distribución de dichos parámetros; mediante la comparación de la distribución real con la distribución obtenida se puede mejorar el ajuste de los modelos para su posterior aplicación.

AGRADECIMIENTOS

Los datos utilizados en este trabajo proceden de un proyecto de Evaluación de Tierras de Navarra financiado por el Servicio de Estructuras Agrarias del Gobierno de Navarra.

BIBLIOGRAFÍA

AUSTIN, M. P., NICHOLLS, A.O. & MARGULES, C.R.; 1990. Measurement for the environmental niche of five *Eucalyptus* species. *Ecological Monographs* 60(2): 161-177.

AUSTIN, M.P. & SMITH, T.M.; 1989. A new model for the continuum concept. *Vegetatio* 83: 35-47.

BRAUN-BLANQUET, J. & BOLÒS, O. de; 1957. Les groupements végétaux du bassin moyen de l'Ebre et leur dynamisme. *Anales*

Est. Exp. Aula Dei 5: 1-266

CREUS, J.; 1986. *Climatología* En: Floristán, A. (ed.) *Gran Atlas de Navarra I, Geografía*, pp. 75-90. C.A.N., Pamplona.

ESCUADERO, A. & PAJARÓN, S.; 1994. Numerical syntaxonomy of the *Asplenietalia petrarchae* in the Iberian Peninsula. *J. Veg. Sci.* 5: 205-214.

GAVILÁN, R. & FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, F.; 1997. Climatic distribution of Mediterranean broad-leaved sclerophyllous and deciduous forests in Central Spain. *J. Veg. Sci.* 8: 377-386.

GUISAN, A. WEISS, S.B. & WEISS A.D.; 1999. GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution. *Plant Ecology* 143 (1):107-122.

HULME, M. & SHEARD, N.; 1999. Escenarios de cambio climático para la Península Ibérica. Unidad de investigación climática, Norwich, Reino Unido, 6 pp.

LENIHAN, J.M.; 1993. Ecological responses of North America boreal tree species and their use in forest classification. *J. Veg. Sci.* 4: 667-680.

LOIDI, J. & BÁSCONES, J.C.; 1995. *Memoria del mapa de series de vegetación de Navarra*. Gobierno de Navarra. Pamplona. 99 pp.

NORUSIS, M.; 1994. *SPSS Advanced Statistics 6.1*. SPSS Inc. Chicago. 606 pp.

OLANO, J.M.; 1995. *Estudio fitoecológico de los bosques de las Sierras de Urbasa, Andia y Entzia: Una aproximación numérica*. Tesis Doctoral. Universidad del País Vasco. 171 pp.

OLANO, J.M., PERALTA, J., DONÉZAR, M. & OSÁCAR, C.; 2000. Floristic composition of basophyllous scrub communities related to a rainfall gradient in Navarre (Northern Spain). *Proceedings of the 41st. Symposium of IAVS* 166-169.

PAUSAS, J.G.; 1993. *Influència dels factors ambientals en l'estructura i el funcionalisme dels boscos pirinencs de pi roig (Pinus sylvestris L.)*. Tesis Doctoral. Universitat de Barcelona. 155 pp.

- PERALTA, J.; 1995-96. *Cartografía y Descripción de la Vegetación de las Comarcas Agrarisa V y VI. Sectorización Fitoclimática. (Evaluación de las Tierras de Viñedo de Navarra)*. Informes inéditos. Servicio de Estructuras Agrarias, Gobierno de Navarra. Pamplona.
- PERALTA, J. & J.M. OLANO; 1997-98. *Cartografía y Descripción de la Vegetación de las Comarcas Agrarias III y IV, II y VII. Sectorización Fitoclimática de Navarra*. Informes inéditos. Servicio de Estructuras Agrarias, Gobierno de Navarra. Pamplona.
- RETUERTO, R. & CARBALLEIRA, A.; 1992. Use of direct gradient analysis to study climate-vegetation relationships in Galicia, Spain. *Vegetatio* 101: 183-194.
- RIVAS-MARTÍNEZ, S.; 1996. *Bioclimatic Map of Europe*. Servicio Cartográfico, Universidad de León.
- YEE, T.W. & MITCHELL, N.D.; 1991. Generalized additive models in ecology. *J. Veg. Sci.* 2: 587-602.